

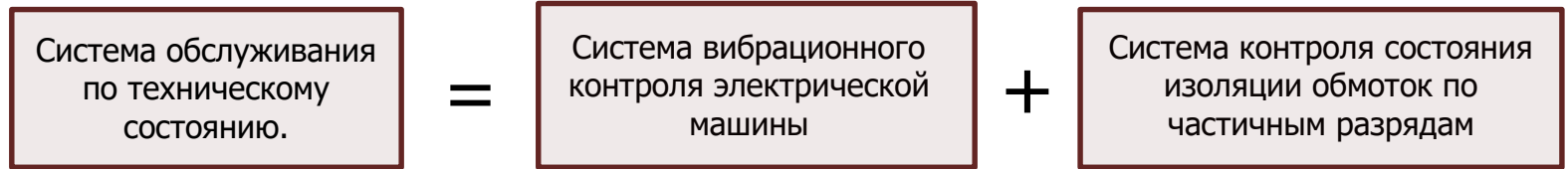
Оценка технического состояния высоковольтных электродвигателей по  
вибрационным параметрам и частичным разрядам в изоляции

Поиск и локализация дефектов в обмотках статоров электрических  
машин по частичным разрядам

Русов В.А., ООО «DIMRUS», Пермь  
[rusov@dimrus.ru](mailto:rusov@dimrus.ru)

Организация эффективного обслуживания и ремонта электрических машин возможна только при использовании современных методов оценки технического состояния, которые позволяют выявлять возникновение дефектных состояний на ранних стадиях, когда у обслуживающего персонала будет еще достаточно времени для подготовки и устранению этих дефектов.

Для крупных электрических машин наиболее важными для оценки состояния являются два метода: вибрационный контроль подшипников и контроль состояния изоляции обмоток по уровню и распределению частичных разрядов в изоляции.



Практическое применение каждого из этих методов в системах обслуживания по состоянию обеспечивается соответствием следующим требованиям:

- Возможность контроля технического состояния вращающихся машин в режимах как периодического, так и непрерывного мониторинга.
- Наличие в программном обеспечении методов встроенных экспертно-диагностических подсистем, позволяющих выявлять типы и локализовать места их возникновения.
- Наличие в составе программного обеспечения методов адаптивных моделей, позволяющих прогнозировать временные и технические аспекты развития выявленных дефектных состояний.



Наиболее простым и оперативным способом регистрации частичных разрядов в статорах электрических машин является использование акустических и акустико-эмиссионных датчиков. Такие датчики монтируются на поверхности статора или на боковых щитах корпуса статора при помощи магнитов или специальных конструктивных элементов. Частота регистрируемых импульсов частичных разрядов – до 500 кГц.

Сравнительная дешевизна и простота установки акустических датчиков на корпусе статора значительно нивелируется их низкой помехозащищенностью. Также, поскольку акустические сигналы от частичных разрядов быстро затухают в конструкциях статора, вторым недостатком использования акустических датчиков является малая зона контроля.

Вторым типом датчиков частичных разрядов, используемых для диагностики электрических машин, и монтируемых на внешней поверхности корпуса статора и на боковых щитах, являются датчики растекания высокочастотных поверхностных токов, которые в литературе принято обозначать как датчики TEV типа.

Эти датчики также оперативно монтируются на поверхности статора при помощи магнитных элементов и регистрируют импульсы в диапазоне до 150 МГц.

Недостатком датчиков типа TEV является очень низкая помехозащищенность. Это происходит потому, что на поверхность корпуса статора наводятся токи не только от внутренних частичных разрядов в обмотке, но и от высокочастотных импульсов, распространяющихся снаружи статора. Внешние высокочастотные импульсы обычно имеют большую амплитуду, и их количество значительно больше. В результате выявить небольшие импульсы от истинных частичных разрядов на фоне интенсивных помех такими датчиками очень сложно.

Вторую группу датчиков частичных разрядов, используемых для регистрации частичных разрядов в электрических машинах, составляют конденсаторы связи и высокочастотные трансформаторы тока. Их объединяет то, что они используют электрические методы регистрации импульсов и монтируются или на проводниках заземления или на питающей линии.

- Высокочастотные конденсаторы связи.

Датчики такого типа подключаются непосредственно к питающему напряжению, поэтому к ним предъявляются жесткие требования по стабильности параметров и работоспособности при наличии перенапряжений. Недостаток конденсаторов связи – высокая цена.

Емкость конденсаторов связи, используемых для регистрации импульсов в обмотках электрических машин, составляет от 80 до 2000 пикофарад. Чем больше емкость конденсатора связи, тем выше будет чувствительность системы регистрации частичных разрядов, тем шире будет частотный диапазон регистрируемых импульсов.

- Высокочастотные трансформаторы токов марки RFCT (в литературе для них также широко используется обозначение HFCT).

Они отличаются от обычных измерительных трансформаторов тока промышленной частоты использованием ферритовых высокочастотных сердечников. Частотный диапазон импульсов частичных разрядов, регистрируемых при помощи датчика типа RFCT, зависит от ферромагнитных свойств сердечника, верхняя граница диапазона обычно не превышает 30 МГц. Чувствительность и помехозащищенность этих датчиков можно характеризовать как средние.

Датчики марки RFCT, в силу своих конструктивных особенностей, монтируются только на проводниках без напряжения. В электрических машинах это обычно проводники заземления корпуса статора, различных экранов, шины нулевых точек обмоток статора.



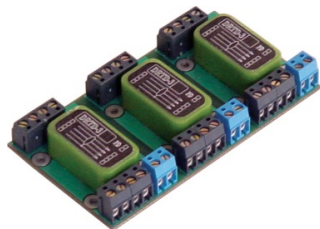
В качестве датчиков частичных разрядов в крупных электрических машинах в последнее время все чаще используются электромагнитные антенны различной конструкции.

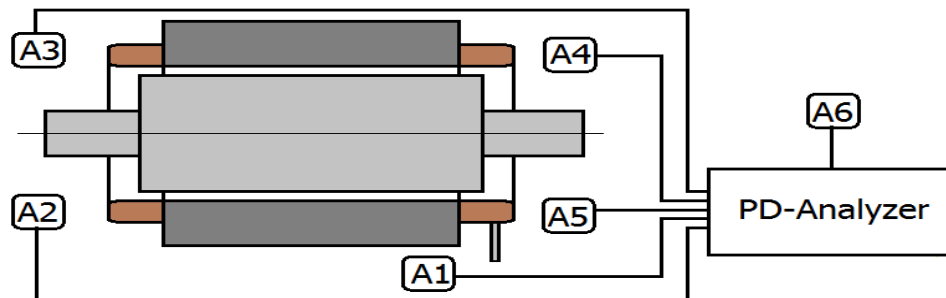
- Электромагнитные антенны, располагающиеся в пазах статора под немагнитным клином. В статоре располагается несколько таких антенн, распределенных по окружности. Встроенные в паз электромагнитные антенны просты по своей конструкции, обладают хорошей чувствительностью и удовлетворительной помехозащищенностью, но сложны в монтаже. Установка таких антенн возможна только на заводе или при капитальном ремонте статора.

- Использование встроенных в пазы статора датчиков температуры в качестве электромагнитных антенн. Эти датчики располагаются в нескольких пазах между секциями обмотки и являются хорошими антеннами для регистрации частичных разрядов. Недостатком таких антенн является то, что они обычно подключены проводами, не предназначенными для передачи высокочастотных сигналов. В результате, при измерении частичных разрядов в крупных электрических машинах, особенно имеющих водородное охлаждение, итоговая чувствительность таких электромагнитных антенн может оказаться недостаточной.

- Электромагнитные антенны, устанавливаемые внутри корпуса статора в зоне лобовых частей. Это достаточно простые и дешевые датчики, работающие в СВЧ диапазоне частот, до 1,5 ГГц. Они крепятся на корпусе статора и не имеют контакта с токоведущими частями обмотки.

Электромагнитные антенны BA-1 производства фирмы Димрус имеют высокую чувствительность и помехозащищенность, так как располагаются внутри металлического корпуса статора. Наличие нескольких антенн внутри статора позволяет проводить электромагнитную локацию места возникновения частичных разрядов в изоляции обмотки статора.





Для контроля частичных разрядов в обмотке статора электрической машины в СВЧ диапазоне внутри статора необходимо устанавливать до пяти электромагнитных антенн.

Первый датчик (электромагнитная антенна А1) устанавливается в зоне входа в статор питающего кабеля, подключенного к обмотке статора. При помощи этой антенны производится отстройка от высокочастотных помех, проникающих в обмотку статора из сети по питающему кабелю.

Электромагнитные антенны А2 – А5 располагаются в зонах лобовых частей обмотки, по две с каждой стороны. Антенны желательно устанавливать диаметрально противоположно друг от друга.

Антенна А6 предназначена для регистрации высокочастотных импульсов снаружи корпуса электрической машины. Использование этой антенны позволяет еще больше повысить помехозащищенность.

Внутренние антенны не должны располагаться в одной плоскости для того, чтобы в последствии повысить точность пространственной локализации мест дефектов в обмотке статора.

Регистрация частичных разрядов производится при помощи прибора PD-Analyzer, позволяющего синхронно регистрировать СВЧ импульсы от 6 электромагнитных антенн.

Системы регистрации и анализа частичных разрядов в обмотках статора с использованием электромагнитных антенн марки ВА-1 в 2018 - 2019 годах были смонтированы на 11 высоковольтных низкооборотных синхронных двигателях марки СДМЗ мощностью 2 и 4 МВт.

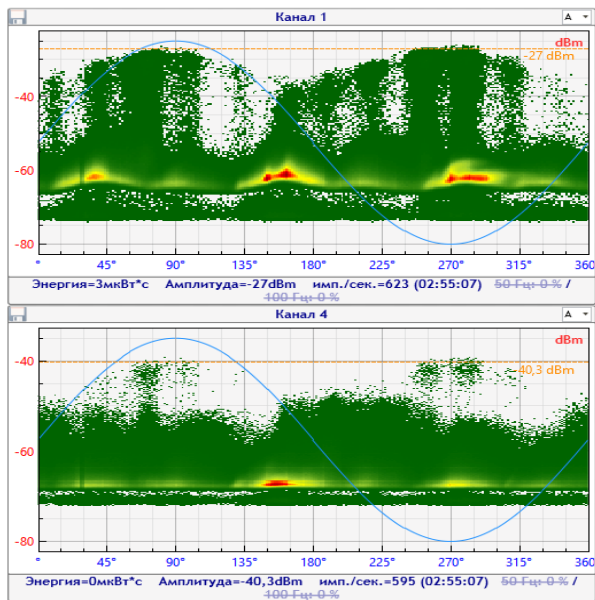
На двигателях меньшей мощности установлено по три антенны ВА-1: две в зонах лобовых частей с двух сторон статора и одна антенна смонтирована в зоне подключения питающего высоковольтного кабеля.

На двигателях большей мощности установлено по 5 электромагнитных антенн: по две в лобовых частях с двух сторон статора диаметрально противоположно. Одна антенна монтировалась в зоне подключения кабеля.

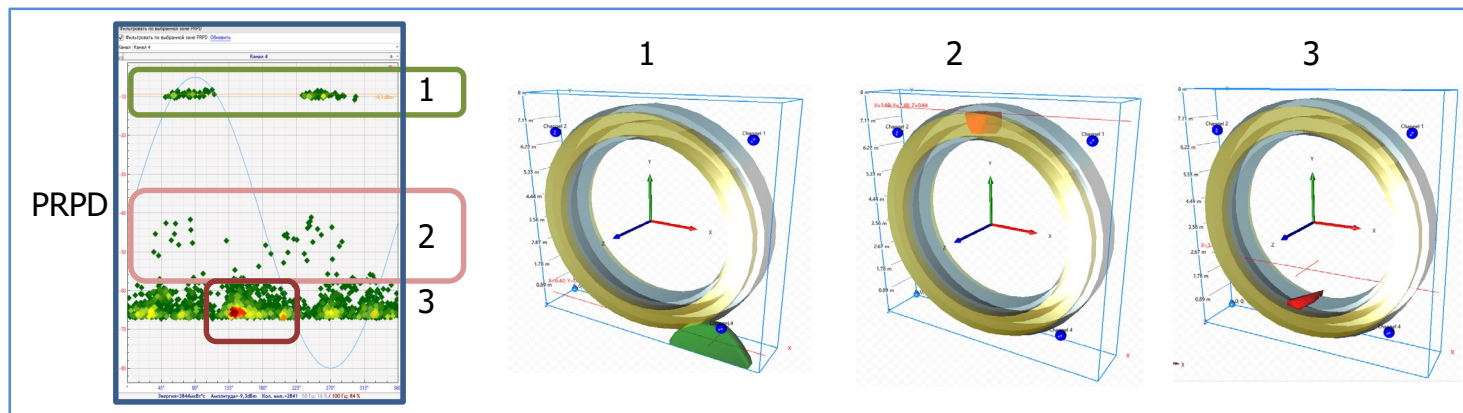
Для регистрации импульсов частичных разрядов использована стационарная система мониторинга на основе шестиканального прибора марки PD-Analyzer-6. Анализ полученной информации, диагностика дефектов и оценка технического состояния производится при помощи специализированного программного обеспечения INVA.

Испытания показали высокую чувствительность смонтированных системы мониторинга и высокую помехозащищенность процесса измерений. Поэтому даже отказались от использования шестой (внешней помеховой) антенны.

Для примера приведены PRPD распределения частичных разрядов на двух контролируемых электродвигателях. На основании анализа этих распределений в ПО INVA в автоматическом режиме определяется тип дефекта в изоляции обмотки статора.







В основе локации лежит анализ времени прихода импульсов от одного разряда к нескольким антеннам. Точность локации в ПО INVA составляет 0,2–0,4 м, и зависит от размеров статора, и мест установки антенн.

На PRPD распределении импульсов цифрой «1» выделены самые большие по амплитуде импульсы, относящиеся к дефекту типа «плавающий потенциал». Дефект локализуется в зоне подключения кабеля питания, поэтому он вероятнее всего находится в концевой муфте питающего кабеля. Это не очень опасный (зеленый) дефект, слабо влияющий на дальнейшую эксплуатацию самой электрической машины.

Дефект «2», с разрядами меньшей амплитуды диагностируется системой как «дефект в изоляции». Он локализуется в зоне лобовых частей обмотки, вверху статора. Это опасный дефект, поэтому он автоматически выделен системой на рисунке статора красным цветом.

Импульсы группы «3» на PRPD диагностируются системой как «разряд в пазу» в нижней части статора. Это опасный дефект, поэтому его место на статоре программой также показано красным цветом.





Система мониторинга марки FDM предназначена для контроля асинхронных электродвигателей переменного тока по спектру потребляемого тока. FDM имеет беспроводное исполнение, к корпусу не подключено проводов питания и связи.

Прибор системы FDM монтируется непосредственно на одном из трех фазных проводов подключения электродвигателя. Напряжение для питания электроники прибора берется от встроенного трансформатора тока, поэтому при включении электродвигателя система FDM автоматически начинает работать.

Для контроля мощных высоковольтных электродвигателей прибор марки FDM монтируется во вторичной цепи измерительных трансформаторов тока.

При помощи встроенного программного обеспечения диагностируются 4 вида дефектов:

- Проблемы короткозамкнутой клетки ротора электродвигателя.
- Контроль эксцентриситета воздушного зазора.
- Наличие замыканий в обмотке статора.
- Дефекты опорных подшипников качения.

Передача итоговой информации о техническом состоянии производится по беспроводному интерфейсу Bluetooth. Приемником может являться смартфон, планшет, модуль связи. Передача на большие расстояния производится при помощи беспроводного интерфейса LoRa.

При использовании FDM в составе систем мониторинга применяется стационарный приемник сигналов марки WDM, подключенный к системе АСУ-ТП.

Внешний диаметр корпуса прибора FDM - 55 (73) мм.

Для оперативного монтажа фирмой разработана разъемная конструкция прибора FDM.



Система мониторинга марки ViBlock предназначена для контроля вибрации вращающегося оборудования: электродвигателей, вентиляторов, насосов и т. д.

Благодаря применению интегральных датчиков, микропроцессоров с низким потреблением и батарей с малым током саморазряда, а также отсутствию соединительных кабельных линий удалось снизить стоимость системы мониторинга на порядок.

ViBlock представляет собой автономное, полностью беспроводное устройство, монтируемое на электродвигателе, насосе, вентиляторе, редукторе. Размер компактного корпуса прибора ViBlock составляет всего 42 \* 62 \* 116 мм.

В состав ViBlock входит трехкоординатный датчик вибрации, датчик температуры, процессор, два интерфейса связи марки Bluetooth и LoRa. Питание осуществляется от встроенной (заменяемой) батареи, обеспечивающей работу в течение не менее 5 лет.

При помощи ViBlock непрерывно контролируется уровень вибрации по трем направлениям. При любом превышении заданного значения, или по расписанию, например, один раз в час, производится полная регистрация информации. Встроенным процессором производится обработка сигналов, получение спектров. При помощи автоматизированной экспертной системы диагностируется наличие дефектов, определяется их тип, и в конечном итоге оперативно выполняется оценка технического состояния оборудования.

Итоговая информация при помощи беспроводного интерфейса Bluetooth передается на смартфон, планшет, и (или) в систему АСУ-ТП на дальность до 50 м. При помощи беспроводного интерфейса LoRa информация передается на сотни метров. При отсутствии препятствий дальность передачи при помощи LoRa составляет несколько километров. Для мониторинга всего оборудования большого цеха достаточно одного приемника.



Спасибо за внимание